

**UNIVERSIDAD COMPLUTENSE
FACULTAD DE CIENCIAS MATEMATICAS**

**CONSEJO SUPERIOR
DE INVESTIGACIONES CIENTIFICAS**

INSTITUTO DE ASTRONOMIA Y GEODESIA

(Centro mixto C.S.I.C. - U.C.M.), MADRID

Publicación núm. 173

PRECISE VLBI SURVEYING AT THE MADRID DSCC

por

A. RIUS y C. JACOBS



**PRESENTADO EN LA «EUROPEAN GEOPHYSICAL SOCIETY XVI GENERAL
ASSEMBLY»**

Barcelona, marzo de 1989

MADRID

1989

PRECISE VLBI SURVEYING AT THE
MADRID DEEP SPACE COMMUNICATIONS COMPLEX

A. Rius

Instituto de Astronomia y Geodesia, C.S.I.C.-U.C.M.,
Facultad de Ciencias Matematicas, E-28040 Madrid, Spain

C.S. Jacobs

Jet Propulsion Laboratory,
California Institute of Technology,
4800 Oak Grove Drive, Pasadena, Cal. 91109

Abstract

The new DSS65 antenna (34 m) located at the Madrid Deep Space Communications Complex (MDSCC) has been equipped with standard (MKIII) S-band and X-band geodetic VLBI instrumentation. This equipment upgrade enables DSS65 to participate in the Crustal Dynamics Project and other global geodynamical campaigns.

With the purposes of a) establishing continuity between the results of the past campaigns which involved other MDSCC antennas and b) providing scheduling flexibility, a high precision VLBI experiment has been performed between the DSS63 (70 m) and DSS65 antennas and correlated at the Caltech/JPL Block II Correlator. The DSS63-DSS65 baseline has been measured with a formal uncertainty of a few millimeters (mm). Systematic measurement errors are estimated to be approximately 10 mm.

The results of this experiment, combined with previous local VLBI surveys, provide the required complete set of vector baselines for DSS61/63/65.

1. Introduction

The MDSCC is part of the NASA Deep Space Network (DSN). The MDSCC contains state of the art instrumentation for undertaking VLBI geodynamical studies. The figure 1 summarizes the present capabilities.

Although the primary use of these facilities is for tracking planetary probes, a significant part of the time is allocated to radioastronomical and geodynamical projects. Until August 1988 the available instrumentation at the MDSCC has allowed the performance of experiments with non-standard geodetic VLBI instrumentation: Mark II, 40 MHz synthesized bandwidth and/or non S/X instrumentation.

The table 2 gives the references for the results of the past geodetic experiments involving the MDSCC and other antennas located in Europe, US, South America and Africa.

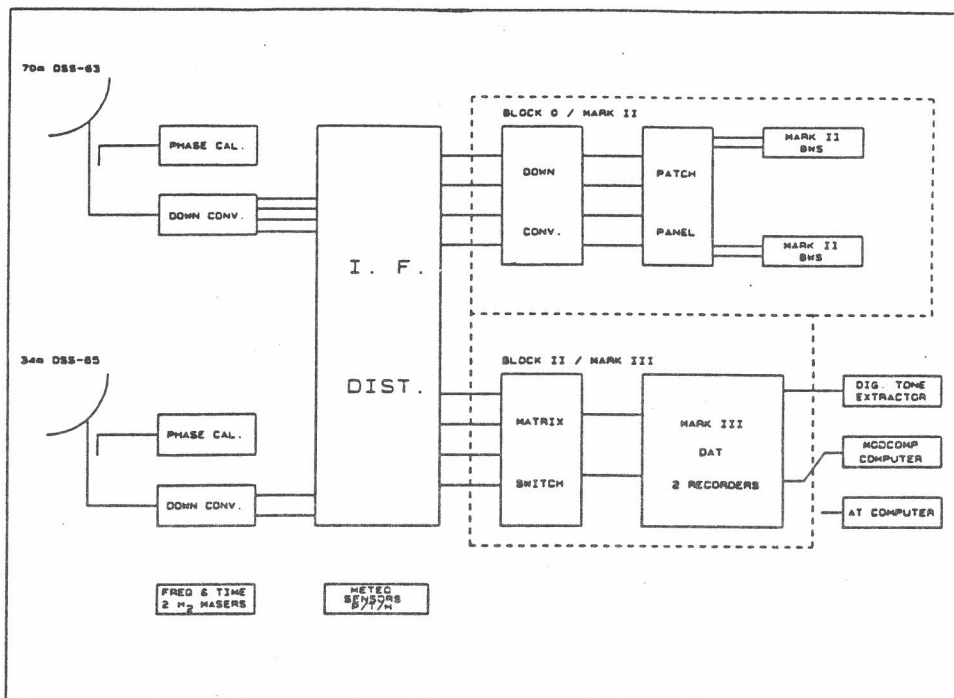


Fig. 1. Present MDSCC capabilities for geodetic and astrometric VLBI

Antennas involved

DSS61-DSS63
DSS61-HarTRAO
DSS61-Effelsberg-Onsala-Haystack
DSS63-Atibaia-Nancay-Onsala-HarTRAO

References

A.Rius et al (1982)
A.Nothing et al (1987)
A.Nothing et al (1987)
G. Petit et al (1988)

Table 2. Geodetic VLBI experiments involving MDSCC

Although all these experiments were performed with suboptimal geodetic VLBI instrumentation, the results obtained retain their interest because of their unicity and their "first epoch" nature.

The full implementation during 1988 of the VLBI capabilities at the DSS65 antenna has allowed the regular participation of the MDSCC into global geodynamical programs like the NASA Crustal Dynamics Project (Vierbuchen et al., 1989). The different ongoing projects will include DSS65 as a primary VLBI reference

point. Therefore, in order to connect the previous results with the new ones a program for measuring the baseline DSS63-DSS65 has been started. The present paper presents the first results obtained in this program.

2. The interferometer setup

This experiment was performed at S-band (2.3 GHz) and X-band (8.4 GHz). We observed with synthesized bandwidths of 40 MHz using two MarkII Bandwidth Synthesis Switching systems. Each bandwidth was synthesized by observing three 2 MHz channels placed at the frequencies -20, 9 and +20 MHz relative to 2285 and 8440 MHz, the center frequencies of the S and X-band TWM preamplifiers used. In order to avoid problems derived from the correlation of signals with small natural fringe rates (i.e the doppler shift due to earth rotation which is of the order 1Hz for a 0.5 km baseline at X Band), we offset the S and X local oscillator frequencies at one antenna by 200 Hz. The two external channels were used to provide a priori information to help in the determination of the cycle ambiguities in the phase data from the internal channel.

With the hope of minimizing signal path length variations as the antenna geometry changes, we maintained the subreflector in a "fixed position".

3. The observations

We have observed sources contained in a subset of the JPL Barycentric J2000 Catalogue (Sovers et al 1988). There were two selection criteria judged according to data from the Very Large Array (VLA) calibrator manual: 1) correlated flux density higher than 2 Jy at 6 cm wavelength and 2) no source structure problems at 1.3, 6 and 20 cm wavelength. The complete set of observations was composed of 62 scans each 180 seconds long. Taking into account the proximity of the antennas, the selection of sources observed was made with the objective of maximizing the sky coverage in the minimum time.

4. Data analysis and Systematic Error Discussion

The correlation of the data has been performed at the JPL-Caltech Block II correlator (Thomas 1987). The correlated data (phase delays, group delays and phase rates) has been analyzed using the JPL Masterfit Software (Sovers and Fanelow, 1987). In the results presented below, correlations between observations are ignored i.e. a diagonal observation covariance matrix was used. The diagonal terms are the root-sum-square (RSS) of the measurement uncertainty due to SNR (typically 0.1 mm) and a constant term (3 mm) chosen to make the Chi square of the fit equal to 1. This constant term is needed to account for unmodeled systematic errors.

a) Reference frame orientation

The a priori delay model uses IRIS determinations of the Earth orientation and the celestial reference frame defined through the sources already mentioned. Comparisons of the intercontinental results produced with different terrestrial and celestial frames and the various packages in use by the VLBI community indicates that our results should be independent of this a priori information to less than 1 mm. For example, even a 100 mas rotation of the 0.5 km baseline produces less than 1 mm change in the baseline.

b) Earth modeling

Maximum tidal effects are approximately:

solid earth tide	300 mm max
atmospheric loading	20 mm max
ocean loading	30 mm max
pole tide	20 mm max

Assuming that these effects vary linearly, over a 0.5 km baseline even a 500 mm tidal effect would cause less than 0.1 mm change in our baseline ($500 \text{ mm} \times 0.5 \text{ km} / 6,300 \text{ km} < 0.1 \text{ mm}$).

c) Ionosphere

For a smoothly varying ionosphere, the line-of-sight differential ionosphere delay is estimated to be $\leq 1 \text{ mm}$ at S-band (2.3 GHz). The ionosphere fluctuations are estimated to be approximately $1.3 \text{ mm} / \sin(\text{elevation})$ at 2.3 GHz (see Callahan, 1984). Ionosphere effects at X-band (8.4 GHz) will be scaled down by the square of the S to X-band frequency ratio and are thus negligible. We have used the S/X dual frequency ionosphere calibration for our data.

d) Instrumental phase variations

The ionosphere calibration discussed above is limited by the lack of instrumental phase calibration. As a result, differential S vs. X-band instrumental phase shifts can be corrupting the ionosphere calibration. The S - X band phase delay baseline estimates (see table 1) differ by 5 sigma (7mm) in the Y component and 3 sigma (-4mm) in the length. These differences are taken as evidence of S - X instrumental phase shifts.

e) Feed rotation

As each antenna tracks a source, the receiver feed rotates causing a change in the measured phase of the circularly polarized signal (we recorded IEEE convention right circular). The effect cancels for group delay measurements. The Masterfit program includes the model of Liewer (1985). Since both antennas are of the same mount type (azimuth-elevation) and both pointed at nearly the same orientation due to the short baseline, this effect has negligible impact on our baseline estimate. For

different mount types (e.g. DSS63 [Az-El]-DSS61 [Ha-Dec]) the effect can be several mm.

f) Subreflector

Because antenna structures deform as they change orientation in a gravity field, the subreflector position of a cassegrain antenna may be adjusted in order to compensate for changes in the antenna focal length (autofocus mode). This adjustment also changes the signal path length (delay) which is the primary observable in geodetic/astrometric experiments such as ours. Katow (1981) analysis of the DSS14 (64m) antenna concluded that fixing (vs. autofocusing) the subreflector minimizes path length variations. Assuming that this conclusion also holds for the DSS63 (70m) and DSS65 (34m) both subreflectors were held fixed. We hope to test this conclusion in a future experiment.

Following Katow(1981), Rius et al. (1987) and Clark and Thomsen (1988), we expect gravitational deformation effects to be proportional to $\sin(\text{Elevation})$. Because the station location local vertical coordinate also has a $\sin(\text{Elevation})$ signature, gravity effects -if not modeled a priori- will be absorbed into the local vertical coordinate of the baseline estimate.

g) Thermal expansion

Assuming a standard value for the mean linear dilatation coefficient of the two instruments less than or equal to the thermal coefficient of steel ($= 1.2\text{E-}5$ /deg), the relative vertical displacement of both antennas is less than 0.25 mm/deg. Assuming that diurnal and/or seasonal temperature variations of 20 deg C occur, thermal expansion effects could reach 5 mm. As the ambient temperature ranged from 3 to 8 degrees C during our experiment, we expect that the thermal expansion effects within our experiment are approximately 1 mm. The model used to obtain the results below has neglected thermal effects, implicitly referring our results to the mean experiment temperature of 5 deg. C.

h) Troposphere calibration

Our a priori model uses measured pressures and temperatures and an estimate of the relative humidity in conjunction with the Lanyi (1984) mapping function. In comparison to intercontinental baselines, the 0.5 km baseline under consideration is insensitive to the troposphere delay. This is because both stations 'see' almost the same troposphere. There are two important effects which limit this insensitivity.

First, the real troposphere exhibits fluctuations which are principally due to variations in the atmospheric water vapor distribution. Because of their random nature, these fluctuations cannot be directly modeled. However, a stochastic model can be used to calculate the observation covariance due to these

fluctuations, thereby weighting more realistically the observations estimation (including correlations between observations). Preliminary tests with an observation covariance derived from the Treuhaft and Lanyi troposphere model (Treuhaft and Lanyi, 1987) indicate that our solutions could be changed by several mm, mainly in the local vertical component of the baseline.

The second effect can be treated more directly. Due to the relative proximity of our antennas, the zenith tropospheric delays of the two stations are nearly equal except for the fluctuation mentioned above and a bias due to the difference in altitudes of the two sites.

Our baseline solution gave an approximate altitude difference between DSS63 and DSS65 of -30 m. Assuming, 1) a dry troposphere scale height of 8.5 km, and a zenith troposphere delay of 210 cm, 2) the dry component of the troposphere to be in hydrostatic equilibrium the DSS65 dry zenith troposphere delay should be increased by 8 mm ($=210 \text{ cm} \times 30\text{m}/8,500 \text{ m}$) relative to DSS63. The wet troposphere (water vapor) scale height is 1-2 km and the wet zenith troposphere delay is 5-10 cm, thus there is potential for zenith delay biases of in the range 1-3 mm. Lacking relative humidity data for our experiment, we used a seasonal average humidity; uncertainty in modeling wet delays as a function of humidity leads to the estimated range of 5-10 cm for wet zenith delay. However it must be stressed that the water vapor distribution is poorly known and cannot be assumed to be in hydrostatic equilibrium. Faced with this limitation, we chose to estimate a wet zenith bias between the two stations. The result was of $3 \pm 1 \text{ mm}$.

1) Local Vertical

The local vertical component of the baseline is of special interest because it is particularly prone to systematic errors. The local vertical's contribution to the geometric delay is proportional to $\sin(\text{elevation})$. Thus the effects listed below which depend on $\sin(\text{elevation})$ will affect the local vertical estimate.

1) Geometry: Whereas all azimuths can be observed, less than half the elevations (6 to 90 deg) can be observed; thus the vertical measurement is fundamentally weaker than the horizontal.

2) Atmospheric effects such as troposphere and ionosphere scale approximately as $1/\sin(\text{elevation})$.

3) Gravitational deformation: the component of gravity along the raypath to the feed is proportional to $\sin(\text{elevation})$.

4) Thermal: Assuming that all sides of the antenna are of nearly uniform temperature, the antenna expansion will mainly change the antenna height.

5. Results

The results are summarized in the table below. All errors listed are 1 sigma formal uncertainties. Our principal result is the S/X phase delay baseline estimate. For this estimate we include the correlations of the XYZ coordinates and the local east,north,vertical (ENV) coordinates. The standard deviations in the local ENV frame are included in order to emphasize that the vertical measurement is much weaker than the horizontal (EN) measurement.

	X (m)	Y(m)	Z(m)	L(m)
S/X Phase	244.100	-308.293	-360.329	533.354
Delay	+/-0.003	+/-0.001	+/-0.003	+/-0.001
Correlation	-0.349 (XY)	0.912 (XZ)	-0.270 (YZ)	
Correlations	0.181 (EN)	-0.057 (EV)	-0.094 (NV)	
ENV sigma	+/-0.001	+/-0.001	+/-0.004	
X Phase	244.100	-308.292	-360.329	533.353
Delay	+/-0.003	+/-0.001	+/-0.003	+/-0.001
S Phase	244.106	-308.285	-360.324	533.349
Delay	+/-0.003	+/-0.001	+/-0.003	+/-0.001
S/X Group	244.063	-308.292	-360.352	533.352
Delay	+/-0.026	+/-0.009	+/-0.023	+/-0.010

Table 1. MASTERFIT estimates
Subreflector fixed. No Phase Calibration.

6. Accuracy

A conventional geodetic survey is being performed by the Spanish Instituto Geografico Nacional with the general objective of connecting the different VLBI antennas with several geodetic signals which will be used in GPS and related projects. The results for this baseline are not yet available as an independent verification of our estimate.

For the present, we are limited to test the internal consistency of our results. As an independent check of the JPL modeling and parameter estimation software, we have analyzed the S/X group delay data using the Bonn VLBI Software System (BVSS). The BVSS estimates of the baseline components and length and the clock are offset are equivalent, within the formal errors, with the MASTERFIT solutions.

7. Conclusions

The measurements performed allow the reference of past experiments using DSS63 and DSS61 to the new DSS65 presently used in connection with the main global S/X Band VLBI and GPS campaigns. Using the phase delay observable, we have made our first measurement of the DSS63-DSS65 baseline vector with formal uncertainties of a few mm. In the future, we plan to repeat the VLBI baseline measurement and compare with a ground survey measurement in order to study sources of systematic error. The phase delay data type will provide the very precise (in the order of 0.1mm) delay measurements needed to investigate VLBI systematic errors at the mm level. For the present, we estimate that systematic errors are at the 10 mm level and are mainly affecting the local vertical component of the baseline.

Acknowledgements

We would like to thank K.M. Liewer and C.D. Edwards for their work in developing the JPL modeling and software for phase delay data.

References

- P.S. Callahan, 'Ionospheric Variations Affecting Altimeter Measurements: A Brief Synopsis', Marine Geodesy, vol. 8, num 1-4, p. 260, 1984.
- T.A. Clark and P. Thomsen, 'Deformations in VLBI antennas', NASA Technical Memorandum 1006696, January 1988.
- C. D. Edwards, 'Size of differential ionosphere for experiment AT85' Unpublished notes, JPL Tracking and Applications Section, 13 Feb 1986
- C.D. Edwards, 'The effect of spatial and temporal wet troposphere fluctuations on connected element interferometry', JPL IOM 335.3-88-98 (internal document), 6 Sep 1988
- M.S. Katow, 'DSS14 64-Meter antenna. Computed RF pathlength changes under gravity loadings', NASA JPL TDA Progress Report 42-64, pp123-131, May 1981
- G.E. Lanyi, 'Tropospheric Delay Effects in Radio Interferometry', Telecommunications and Data Acquisition Progress Report 42-78, pp. 152-159, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena California, April-June 1984.
- K.M. Liewer, 'Antenna Rotation Corrections to VLBI Data' JPL IOM 335.4-499 (internal document), March 29, 1985.

A.Noethnagel et al., 'VLBI for Geodynamics Involving the Harttebeesthoek Radio Astronomy Observatory', Mitteilungen aus den Geodatischen Instituten der Universitat Bonn ,Nr. 72 Bonn 1987

G. Petit et al., 'Positionnement par Interferometrie sur Radio-Sources des Stations de Nancay et Atibaia dans un systeme de reference terrestre', La Figure de la Terre du XVIII Siecle a l'Ere Spatial, Gauthier Villars ed, Paris 1988

A.Rius and E. Calero, 'Comparison of VLBI and Conventional Surveying of the Madrid DSN antennas', VLBI Techniques, CNES 1982

A. Rius, J. Rodriguez and J. Campbell, 'Geodetic VLBI with Large Antennas', Mitteilungen aus den Geodatischen Instituten der Universitat Bonn ,Nr. 72 Bonn 1987

O.J. Sovers and J. L. Fanselow, 'Observation Model and parameter partials for the JPL VLBI Parameter estimation software "MASTERFIT"-1987', JPL Publication 83-39 Revision 3. 15 December 1987.

O.J. Sovers, et al, 'Astrometric Results of 1978-1985 Deep Space Network Radio Interferometry: The JPL 1987-1 Extragalactic Source Catalog', Astronomical Journal, vol 95, num. 6, June 1988.

J.B. Thomas, 'Interferometry Theory for the BlockII Procesor' NASA JPL publication 87-29, 15 October 1987.

R. N. Treuhaft and G.E. Lanyi. 'The effect of the Dynamic wet troposphere measurements on Radiointerferometric measurements', Radio Science, 22, 251-265, 1987

J. Vierbuchen et al, 'Results of the First VLBI MarkIII Experiments including the Madrid Station', This Symposium, 1989

PUBLICACIONES DEL INSTITUTO DE ASTRONOMIA Y GEODESIA
DE LA UNIVERSIDAD COMPLUTENSE — MADRID

(Antes Seminario de Astronomía y Geodesia)

- 1.—Efemérides de 63 Asteroides para la oposición de 1950 (1949).
- 2.—E. PAJARES: Sobre el cálculo gráfico de valores medios (1949).
- 3.—J. PENSADO: Órbita del sistema visual σ^2 U Maj (1950).
- 4.—Efemérides de 79 Asteroides para la oposición de 1951 (1950).
- 5.—J. M. TORROJA: Corrección de la órbita del Asteroide 1395 "Aribeda" (1950).
- 6.—R. CARRASCO y J. M. TORROJA: Rectificación de la órbita del Asteroide 1371 "Resi" (1971).
- 7.—J. M. TORROJA y R. CARRASCO: Rectificación de la órbita del Asteroide 1560 (1942 XB) y efemérides para la oposición de 1951 (1951).
- 8.—M. L. SIEGRIST: Órbita provisional del sistema visual Σ 728-32 Orionis (1951).
- 9.—Efemérides de 79 Asteroides para la oposición de 1952 (1951).
- 10.—J. PENSADO: Órbita provisional de Σ 1883 (1951).
- 11.—M. L. SIEGRIST: Órbita provisional del sistema visual Σ 2052 (1952).
- 12.—Efemérides de 88 Asteroides para la oposición de 1953 (1952).
- 13.—J. PENSADO: Órbita de ADS 9380 = Σ 1879 (1952).
- 14.—F. ALCÁZAR: Aplicaciones del Radar a la Geodesia (1952).
- 15.—J. PENSADO: Órbita de ADS 11897 = Σ 2438 (1952).
- 16.—B. RODRÍGUEZ-SALINAS: Sobre varias formas de proceder en la determinación de períodos de las marcas y predicción de las mismas en un cierto lugar (1952).
- 17.—R. CARRASCO y M. PASCUAL: Rectificación de la órbita del Asteroide 1528 "Conrada" (1953).
- 18.—J. M. GONZÁLEZ-ABOIN: Órbita de ADS 1709 = Σ 228 (1953).
- 19.—J. BALTÁ: Recientes progresos en Radioastronomía. Radiación solar hiperfrecuente (1953).
- 20.—J. M. TORROJA y A. VÉLEZ: Corrección de la órbita del Asteroide 1452 (1938 DZ₁) (1953).
- 21.—J. M. TORROJA: Cálculo con Cracovianos (1953).
- 22.—S. AREND: Los polinomios ortogonales y su aplicación en la representación matemática de fenómenos experimentales (1953).
- 23.—J. M. TORROJA y V. BONGERA: Determinación de los instantes de los contactos en el eclipse total de Sol de 25 de febrero de 1952 en Cogo (Guinea Española) (1954).
- 24.—J. PENSADO: Órbita de la estrella doble Σ 2 (1954).
- 25.—J. M. TORROJA: Nueva órbita del Asteroide 1420 "Radcliffe" (1954).
- 26.—J. M. TORROJA: Nueva órbita del Asteroide 1557 (1942 AD) (1954).
- 27.—R. CARRASCO y M. L. SIEGRIST: Rectificación de la órbita del Asteroide 1290 "Albertine" (1954).
- 28.—J. PENSADO: Distribución de los períodos y excentricidades y relación período-excentricidad en las binarias visuales (1955).
- 29.—J. M. GONZÁLEZ-ABOIN: Nueva órbita del Asteroide 1372 "Haremarí" (1955).
- 30.—M. DE PASCUAL: Rectificación de la órbita del Asteroide 1547 (1929 CZ) (1955).
- 31.—J. M. TORROJA: Órbita del Asteroide 1554 "Yugoslavia" (1955).
- 32.—J. PENSADO: Nueva órbita del Asteroide 1401 "Lavonne" (1956).
- 33.—J. M. TORROJA: Nuevos métodos astronómicos en el estudio de la figura de la Tierra (1956).
- 34.—D. CALVO: Rectificación de la órbita del Asteroide 1466 "Mündleira" (1956).
- 35.—M. L. SIEGRIST: Rectificación de la órbita del Asteroide 1238 "Predappia" (1956).

- 36.—J. PENSADO: Distribución de las inclinaciones y de los polos de las órbitas de las estrellas dobles visuales (1956).
- 37.—J. M. TORROJA y V. BONGERA: Resultados de la observación del eclipse total de Sol de 30 de junio de 1954 en Sydkoster (Suecia) (1957).
- 38.—St. WIERZBINSKI: Solution des équations normales par l'algorithme des cracoviens (1958).
- 39.—J. M. GONZÁLEZ-ABOIN: Rectificación de la órbita del Asteroide 1192 "Prisma" (1958).
- 40.—M. LÓPEZ ARROYO: Sobre la distribución en longitud heliográfica de las manchas solares (1958).
- 41.—F. MÚGICA: Sobre la ecuación de Laplace (1958).
- 42.—F. MARTÍN ASÍN: Un estudio estadístico sobre las coordenadas de los vértices de la triangulación de primer orden española (1958).
- 43.—St. WIERZBINSKI: Orbite améliorée de h 4530 = γ Cen = Cpd -48° , 4965 (1958).
- 44.—D. CALVO BARRENA: Rectificación de la órbita del Asteroide 1164 "Kobolda" (1958).
- 45.—M. LÓPEZ ARROYO: El ciclo largo de la actividad solar (1959).
- 46.—F. MÚGICA: Un nuevo método para la determinación de la latitud (1959).
- 47.—J. M. TORROJA: La observación del eclipse de 2 de octubre de 1959 desde El Aaiun (Sahara) (1960).
- 48.—J. M. TORROJA, P. JIMÉNEZ-LANDI y M. SOLÍS: Estudio de la polarización de la luz de la corona solar durante el eclipse total de Sol del día 2 de octubre de 1959 (1960).
- 49.—E. PAJARES: Sobre el mecanismo diferencial de un celóstato (1960).
- 50.—J. M. GONZÁLEZ-ABOIN: Sobre la diferencia entre los radios vectores del elipsoide internacional y el esferoide de nivel (1960).
- 51.—J. M. TORROJA: Resultado de las observaciones del paso de Mercurio por delante del disco solar del 7 de noviembre de 1960 efectuadas en los observatorios españoles (1961).
- 52.—F. MÚGICA: Determinación de la latitud por el método de los verticales simétricos (1961).
- 53.—M. LÓPEZ ARROYO: La evolución del área de las manchas solares (1962).
- 54.—F. MÚGICA: Determinación simultánea e independiente de la latitud y longitud mediante verticales simétricos (1962).
- 55.—P. DÍEZ-PICAZO: Elementos de la órbita de la variable eclipsante V 499 Scorpionis (1964).
- 56.—J. M. TORROJA: Los Observatorios Astronómicos en la era espacial (1965).
- 57.—F. MARTÍN ASÍN: Nueva aportación al estudio de la red geodésica de primer orden española y su comparación con la red compensada del sistema europeo (1966).
- 58.—F. SÁNCHEZ MARTÍNEZ: La Luz Zodiacal. Luz del espacio interplanetario (1966).
- 59.—J. M. GONZÁLEZ-ABOIN: Variaciones de las coordenadas geodésicas de los vértices de una red, por cambio de elipsoide de referencia (1966).
- 60.—F. SÁNCHEZ MARTÍNEZ y R. DUMONT: Fotometría absoluta de la raya verde y del continuo atmosférico en el Observatorio Astronómico del Teide (Tenerife), de enero de 1964 a julio de 1965 (1967).
- 61.—M. REGO: Estudio del espectro de la estrella 31 Aql. en la región $\lambda\lambda$ 4000-6600 Å (1969).
- 62.—C. MACHÍN: Mareas terrestres (1969).
- 63.—J. M. TORROJA: La estación para la observación de satélites geodésicos de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Madrid (1969).
- 64.—M. J. SEVILLA: Reducción automática de posiciones de estrellas (1970).
- 65.—J. M. TORROJA: Memoria de las actividades del Seminario de Astronomía y Geodesia de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Madrid en 1969 (1970).
- 66.—M. J. SEVILLA: Los cálculos de estación en triangulación espacial (1970).
- 67.—MANUEL E. REGO: Determinación de las abundancias de los elementos en la atmósfera de la estrella de alta velocidad 31 Aql. (1970).
- 68.—M. J. FERNÁNDEZ-FIGUEROA: Análisis cualitativo del espectro de la estrella peculiar HD 18474 (1971).
- 69.—J. M. TORROJA: Memoria de las actividades del Seminario de Astronomía y Geodesia de la Universidad Complutense de Madrid en 1970 (1971).

- 70.—R. VIEIRA y R. ORTIZ: Descripción de un aparato para medida de coordenadas (1971).
- 71.—J. M. TORROJA: Memoria de las actividades del Seminario de Astronomía y Geodesia de la Universidad Complutense de Madrid en 1971 (1972).
- 72.—M. J. FERNÁNDEZ-FIGUEROA: Observación y estudio teórico del espectro de la estrella peculiar HD 18474 (1972).
- 73.—M. J. SEVILLA: Cálculo de las constantes de distorsión y parámetros del disco obturador para cámaras balísticas (1973).
- 74.—R. PARRA y M. J. SEVILLA: Cálculo de efemérides y previsiones de pasos de satélites geodésicos (1973).
- 75.—M. REGO y M. J. FERNÁNDEZ-FIGUEROA: Resultado de las observaciones de α Peg efectuadas desde el satélite europeo TDI (1973).
- 76.—E. SIMONNEAU: Problemas en la determinación de abundancias de elementos en las estrellas en condiciones de equilibrio termodinámico local y alejadas del equilibrio termodinámico local (1974).
- 77.—J. ARANDA: Construcción de modelos de estructura interna para estrellas en la secuencia principal inicial (1974).
- 78.—R. ORTIZ, M. J. SEVILLA y R. VIEIRA: Estudio de la calibración, técnica de medida y automatización de datos en un comparador para medidas de placas estelares (1974).
- 79.—M. J. SEVILLA: Método autocorrector para el cálculo de direcciones de satélites geodésicos y análisis de los errores en la restitución de un arco de órbita (1974).
- 80.—M. A. ACOSTA, R. ORTIZ y R. VIEIRA: Diseño y construcción de un fotómetro fotoeléctrico para la observación de ocultaciones de estrellas por la Luna (1974).
- 81.—T. J. VIVES, C. MORALES, J. GARCÍA-PELAYO y J. BARBERO: Fotometría fotográfica UBV del cúmulo galáctico King 19 (1974).
- 82.—R. ORTIZ y R. VIEIRA: Control automático en posición y tiempo de los sistemas de obturación de las cámaras de observación de satélites geodésicos (1974).
- 83.—J. M. TORROJA: Memoria de las actividades del Seminario de Astronomía y Geodesia de la Universidad Complutense de Madrid en 1972 y 1973 (1974).
- 84.—M. J. FERNÁNDEZ-FIGUEROA y M. REGO: α CrB en el ultravioleta lejano (1975).
- 85.—J. M. TORROJA, R. VIEIRA, R. ORTIZ y M. J. SEVILLA: Estudio de mareas terrestres en España (1975).
- 86.—M. J. SEVILLA y R. PARRA: Levantamiento gravimétrico de Lanzarote (1975).
- 87.—P. KUNDANMAL SUKHWANI: Modelos teóricos de curvas de luz. Su aplicación al sistema β Lyrae (1975).
- 88.—M. J. SEVILLA: Coordenadas astronómicas y geodésicas, Desviación relativa de la vertical (1975).
- 89.—C. TEJEDOR: Fotometría fotoeléctrica R. G. U. del cúmulo galáctico IC 2581 (1976).
- 90.—M. J. SEVILLA: Nuevos coeficientes para la reducción automática de posiciones de estrellas (1976).
- 91.—M. REGO: Técnicas observacionales en espectroscopía astrofísica (1976).
- 92.—M. J. SEVILLA: Determinación de la latitud por distancias cenitales de la polar, método de Littrow (1976).
- 93.—T. J. VIVES: Determinación fotométrica del tipo espectral de la componente desconocida de una estrella binaria eclipsante (1976).
- 94.—M. REGO y M. J. FERNÁNDEZ-FIGUEROA: Contraste y determinación por métodos astrofísicos de fuerzas de oscilador (1977).
- 95.—M. J. SEVILLA y R. CHUECA: Determinación de acimutes por observación de la Polar. Método micrométrico (1977).
- 96.—JOSÉ M. GARCÍA-PELAYO: Fotometría R G U en un campo del anticentro galáctico, cerca del NGC 581 (1977).
- 97.—JOSÉ M. GARCÍA-PELAYO: Datos fotométricos de 2.445 estrellas estudiadas en la región de Casiopea, entre los cúmulos abiertos Trumpler 1 y NGC 581 (1977).
- 98.—PREM K. SUKHWANI y RICARDO VIEIRA: Spectral Analysis of Earth Tides (1977).
- 99.—JOSÉ M. TORROJA y RICARDO VIEIRA: Earth Tides in Spain. Preliminary results (1977).
- 100.—PREM K. SUKHWANI y RICARDO VIEIRA: Three different methods for taking in account the gaps in spectral analysis of Earth Tides records (1978).
- 101.—R. VIEIRA: Mareas terrestres (1978).
- 102.—M. J. SEVILLA y A. NÚÑEZ: Determinación de la longitud por el método de Mayer. Programas de cálculo automático (1979).
- 103.—M. J. SEVILLA y A. NÚÑEZ: Determinación de la latitud por el método de Sterneck. Programas de cálculo automático (1979).
- 104.—M. J. SEVILLA: Determinación de la latitud y la longitud por el método de alturas iguales. Programas de cálculo automático (1979).
- 105.—P. K. SUKHWANI y A. GIMÉNEZ: Corrección de efectos atmosféricos para imágenes tomadas desde satélites Landsat (1979).
- 106.—M. J. SEVILLA: Inversión de Matrices Simétricas en el método de mínimos cuadrados (1979).

(continúa en la cuarta de cubierta)

- 107.—A. GIMÉNEZ: Análisis de la curva de luz del sistema binario eclipsante S Velorum (1979).
- 108.—M. J. SEVILLA: Determinación del acimut de una referencia por observación de la estrella polar. Programa de cálculo automático (1979).
- 109.—M. J. SEVILLA: El sistema IAU (1976) de constantes astronómicas y su repercusión en la reducción de posiciones de estrellas (Primera parte) (1980).
- 110.—M. J. SEVILLA y R. PARRA: Determinación de la latitud por el método de Horrebow-Talcott. Programas de Cálculo Automático (1980).
- 111.—M. J. SEVILLA: Determinación de la latitud y la longitud por fotografías cenitales de estrellas (1980).
- 112.—R. VIEIRA y M. OREJANA: Comunicaciones presentadas en las XLI y XLII Jornadas del Grupo de Trabajo de Geodinámica del Consejo de Europa, Luxemburgo (1979-80).
- 113.—M. J. SEVILLA: Sobre un método de cálculo para la resolución de los problemas geodésicos directo e inverso (1981).
- 114.—R. VIEIRA, J. M. TORROJA, C. TORO, F. LAMBAS, M. OREJANA y P. K. SUKHWANI: Comunicaciones presentadas en el IX Symposium Internacional de Mareas Terrestres. Nueva York (1981).
- 115.—M. A. MONTULL, M. J. SEVILLA y A. GONZÁLEZ-CAMACHO: Aplicación de la V. L. B. I al estudio del movimiento del Polo (1981).
- 116.—A. GONZÁLEZ-CAMACHO y M. J. SEVILLA: Algunas relaciones entre diferentes ejes que se consideran en la rotación de la Tierra (1981).
- 117.—R. VIEIRA, F. LAMBAS y E. GIMÉNEZ: Modificaciones realizadas en un gravímetro LaCoste Romberg mod. G para su utilización en registro continuo de la gravedad (1981).
- 118.—R. VIEIRA: La microrred de mareas gravimétricas del Sistema Central (1981).
- 119.—J. M. TORROJA y R. VIEIRA: Informe sobre el desarrollo del programa de investigación sobre mareas terrestres en el último bienio (1981).
- 120.—F. LAMBAS y R. VIEIRA: Descripción, estudio de la precisión y aplicaciones geodésicas y geofísicas de los nuevos niveles de lectura electrónica (1981).
- 121.—M. J. SEVILLA: Programación del método de la cuerda (1981).
- 122.—J. M. TORROJA: Historia de la Ciencia Árabe. Los Sistemas Astronómicos (1981).
- 123.—M. J. SEVILLA y R. VIEIRA: Comunicaciones presentadas en la Sesión Científica de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, celebrada el día 13 de enero de 1982 (1982).
- 124.—M. J. SEVILLA y P. ROMERO: Aplicación del método de colocación a la reducción de placas fotográficas de estrellas (1982).
- 125.—M. J. SEVILLA y A. G. CAMACHO: Deformación rotacional de una tierra elástica (1982).
- 126.—M. J. SEVILLA y P. ROMERO: Obtención de las medidas de la precisión en la determinación de la latitud y la longitud por fotografías cenitales de estrellas (1982).
- 127.—M. J. SEVILLA, A. G. CAMACHO y P. ROMERO: Comunicaciones presentadas en la IV Asamblea Nacional de Astronomía y Astrofísica. Santiago de Compostela (1983).
- 128.—M. J. SEVILLA: El sistema IAU (1976) de constantes astronómicas y su repercusión en la reducción de posiciones de estrellas (Segunda parte) (1983).
- 129.—M. J. SEVILLA: Geodesia por satélites y navegación (1983).
- 130.—L. GARCÍA ASENSIO, A. G. CAMACHO, P. ROMERO y M. J. SEVILLA: Comunicaciones presentadas en la V Asamblea Nacional de Geodesia y Geofísica (1983).
- 131.—M. J. SEVILLA: Anomalías de la gravedad basadas en el sistema geodésico de referencia 1980 (1983).
- 132.—J. M. TORROJA: Historia de la Física hasta el siglo XIX. La Mecánica Celeste (1983).
- 133.—A. G. CAMACHO y M. J. SEVILLA: The Molodensky Problem for an homogeneous liquid core (1984).
- 134.—J. M. TORROJA: La obra astronómica de Alfonso X El Sabio (1984).
- 135.—H. MORITZ: Sistemas de referencia en Geodesia (1984).
- 136.—H. MORITZ: Rotación de la Tierra (1984).
- 137.—A. G. CAMACHO y M. J. SEVILLA: Autofrecuencias del movimiento del Polo para un modelo de Tierra de tipo Jeffreys Molodensky (1984).
- 138.—J. M. TORROJA: Nuevas definiciones en el problema de la medida del tiempo (1984).
- 139.—M. J. SEVILLA: Astronomía Geodésica (1984).
- 140.—M. J. SEVILLA y M. D. MARTÍN: Diseño de una Microrred en la Caldera del Teide para el estudio de deformaciones de la corteza en la zona (1986).
- 141.—R. VIEIRA, C. DE TORO y V. ARAÑA: Estudio Microgravimétrico en la Caldera del Teide (1986).
- 142.—M. J. SEVILLA, M. D. MARTÍN y A. G. CAMACHO: Análisis de Datos y Compensación de la primera campaña de observaciones en la Caldera del Teide (1986).
- 143.—M. J. SEVILLA y P. ROMERO: Hamiltonian Formulation of the polar motion for an elastic earth's model (1986).
- 144.—P. ROMERO y M. J. SEVILLA: The Sasao-Okubo-Saito equations by Hamilton Theory. First Results (1986).

(continúa en la segunda de cubierta)

- 145.—R. VIEIRA, M. J. SEVILLA, A. G. CAMACHO y M. D. MARTÍN: Geodesia de precisión aplicada al control de movimientos y deformaciones en la Caldera del Teide (1986).
- 146.—R. VIEIRA, J. M. TORROJA, C. DE TORO, B. DUCARME, J. KAARIAINEN, E. MEGÍAS y J. FERNÁNDEZ: Comunicaciones presentadas en el X Symposium Internacional de Mareas Terrestres. Madrid, 1985 (1986).
- 147.—M. J. SEVILLA, A. G. CAMACHO y P. ROMERO: Comunicaciones presentadas en el X Symposium Internacional de Mareas Terrestres. Madrid, 1985 (1986).
- 148.—M. J. SEVILLA: Formulación de modelos matemáticos en la compensación de redes Geodésicas: III Curso de Geodesia Superior (1986).
- 149.—H. LINKWITZ: Compensación de grandes redes geodésicas: III Curso de Geodesia Superior (1986).
- 150.—H. HENNEBERG: Redes geodésicas de alta precisión: III Curso de Geodesia Superior (1986).
- 151.—M. J. SEVILLA: Cartografía Matemática (1986).
- 152.—P. ROMERO y M. J. SEVILLA: Tratamiento Canónico del problema de Poincare. Movimiento del Polo. (1986)
- 153.—A. G. CAMACHO y M. D. MARTÍN: Constreñimientos internos en la compensación de Estaciones. (1986)
- 154.—J. OTERO: An Approach to the Scalar Boundary Value Problem of Physical Geodesy by Means of Nash-Hörmander Theorem. (1987)
- 155.—M. J. SEVILLA: Introducción al Problema Clásico de Molodensky. (1987)
- 156.—F. SANSÓ: Problemas de Contorno de la Geodesia Física. (1987)
- 157.—M. J. SEVILLA: Colocación mínimos cuadrados. (1987)
- 158.—L. MUSSIO: Estrategias del Método de colocación. Ejemplos de aplicación. (1987)
- 159.—M. J. SEVILLA, P. MUÑOZ, J. VELASCO y P. ROMERO: Calibración de un Distanciómetro de infrarrojos en una Base Interferométrica (1987).
- 160.—A. RIUS, J. RODRÍGUEZ, M. J. SEVILLA, R. VIEIRA, J. FERNÁNDEZ, C. DE TORO, A. G. CAMACHO y V. ARAÑA: Comunicaciones presentadas en la Sesión Científica de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, celebrada el día 4 de mayo de 1988 (1988).
- 161.—R. VIEIRA, A. G. CAMACHO y C. DE TORO: Cálculo de la Corrección de Marea en la Península Ibérica (1988).
- 162.—A. G. CAMACHO, R. VIEIRA, C. DE TORO y J. FERNÁNDEZ: Estudio Gravimétrico de la Caldera del Teide (1988).
- 163.—A. J. GIL, M. J. SEVILLA, G. RODRÍGUEZ y J. OTERO: Aplicaciones de la colocación y Estudios del Geoide (1988).
- 164.—R. VIEIRA, J. FERNÁNDEZ, C. DE TORO, A. G. CAMACHO y M. V. RUYMBEKE: Investigaciones Geodinámicas en la Isla de Lanzarote (1988).
- 165.—M. J. SEVILLA, P. ROMERO, A. NÚÑEZ y B. BADA: Compensaciones y resultados (1988).
- 166.—R. VIEIRA, C. DE TORO y A. G. CAMACHO: Investigaciones en mareas (1988).
- 167.—A. NÚÑEZ, M. J. SEVILLA y J. M. AGRIA: Determinación Astrogeodésica del Geoide en Portugal (1988).
- 168.—M. J. SEVILLA y P. ROMERO: Pre-Processing Geodetic Data of the Volcanic area of Teide to monitoring deformations (1988).
- 169.—M. J. SEVILLA y A. J. GIL: Fórmulas diferenciales para los problemas Geodésicos directo e inverso en el método de la cuerda (1988).
- 170.—Zd. SIMÓN, V. STANCHEV, C. DE TORO, A. P. VENEDIKOV y R. VIEIRA: Relation between earth tide observations and some other data (1988).
- 171.—J. OTERO: On the Global Solvability of the fixed gravimetric boundary value problem (1989).
- 172.—R. VIEIRA, J. FERNÁNDEZ, C. DE TORO y A. G. CAMACHO: Comunicaciones presentadas en el XI International Symposium on earth tides. Helsinki (1989).